

# Topologieoptimierung für strömungsführende Bauteile im Fahrzeugentwicklungsprozess

**Prof. Dr.-Ing. habil. Karl Bühler**

Fakultät Maschinenbau  
und Verfahrenstechnik (M+V)

Badstraße 24  
77652 Offenburg  
Tel.: 0781 205-268  
E-Mail: k.buehler@hs-offenburg.de

**1948:** Geboren in Achern

Lehre als Mechaniker

**1971:** Ing. (grad.) Ingenieurschule Offenburg

**1975:** Diplom Maschinenbau Universität Karlsruhe

**1979:** Promotion über Thermokonvektion

**1985:** Habilitation über Rotierende Strömungen,  
Privatdozent Universität Karlsruhe

**1986:** Professor Universität Karlsruhe

**Seit 1991:** Professor an der Hochschule Offenburg

**Seit 1994:** Mitglied des Instituts für Angewandte Forschung (IAF)  
der Hochschule Offenburg

**1999, 2009:** Forschungsaufenthalte an der University of Colorado at Boulder, USA

Zahlreiche Veröffentlichungen auf dem Gebiet der Thermo- und Fluidodynamik, darunter Strömungsmechanik (Springer 1991), Grundzüge der Strömungslehre (Vieweg + Teubner 2010), Hütte-Grundlagen der Ingenieurwissenschaften (Kap. Strömungsmechanik)

**Forschungsgebiete:** Strukturbildung in der Thermo- und Fluidodynamik,  
Anwendungen der Computeralgebra, Numerische Strömungssimulation CFD



**Prof. Dr.-Ing. Gerhard Kachel**

Fakultät Maschinenbau  
und Verfahrenstechnik (M+V)  
Prodekan und Studiendekan  
Maschinenbau (Bachelor)

Badstraße 24  
77652 Offenburg  
Tel.: 0781 205-167  
E-Mail: gerhard.kachel@hs-offenburg.de

**1962:** Geboren in Heilbronn/Neckar, Studium Allgemeiner Maschinenbau, Universität Karlsruhe (TH), Schwerpunkte:

Technische Mechanik/Dynamik, Strömungslehre/Gasdynamik

**1988:** Diplom Maschinenbau, Universität Karlsruhe (TH),

Mitarbeiter der Daimler-Benz-AG, Stuttgart

Wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Maschinenkonstruktionslehre und Kraftfahrzeugbau, Universität Karlsruhe (TH)

**1997:** Promotion zum Thema „Rechnerische Auslegung, Analyse und Optimierung einer mechanischen variablen Ventilsteuerung“, Fakultät für Maschinenbau, Universität Karlsruhe (TH), Robert Bosch GmbH, Bereich „Fahrtdynamische Regelsysteme“, Aufgaben: Sicherheitsarchitektur, Funktions- und Software-Entwicklung, zuletzt funktionale Verantwortung für fahrdynamische Regelsysteme als System-Projektleiter für einen Großkunden.

**Seit 2005:** Professor an der Hochschule Offenburg in der Fakultät Maschinenbau und Verfahrenstechnik.

**Seit 2009:** Prodekan der Fakultät Maschinenbau und Verfahrenstechnik und Studiendekan des Bachelor-Studiengangs Maschinenbau

**Lehrgebiete:** Technische Mechanik, Finite Elemente Methode, Maschinenelemente

**Forschungsgebiete:** Numerische Strukturanalyse und -optimierung,  
Numerische Strömungsoptimierung



## 3.5 Topologieoptimierung für strömungsführende Bauteile im Fahrzeugentwicklungsprozess

Prof. Dr.-Ing. habil. Karl Bühler  
Prof. Dr.-Ing. Gerhard Kachel  
M. Sc. Andreas Gottlieb  
M. Sc. Michael Quarti

### Abstract

This article gives an overview of the method of topology optimization in the field of computational fluid dynamics based on local optimization criteria. The main idea of the method is to prohibit recirculation zones in order to reduce

the pressure loss in the whole flow domain. In studies it was shown, that there are many application for this method.

On the example of the a distributor nozzle in a climate system of a truck, the potential of this technique is shown in a practical example. In this example it becomes apparent, that the prohibition of backflow doesn't optimize only the pressure loss. There is also an improvement of the mass flux distribution at the outlet of the flow domain.

### Einleitung

Um bei der Produktentwicklung auf die

immer höheren Anforderungen wie Effizienz- oder Kostenoptimierung reagieren zu können, stehen die Unternehmen vor der Herausforderung, neue, leistungsfähige Komponenten zu entwickeln. Hierzu müssen geeignete Entwicklungswerkzeuge zur Verfügung stehen.

Bei der Auslegung von strömungsführenden Bauteilen wie zum Beispiel Rohrleitungen, Krümmern oder Ansaugstutzen wird meist auf Standard-Konstruktionen zurückgegriffen. Hierzu zählen zum Beispiel gerade Rohre, 90 Grad- Umlenkungen und Diffusoren.

Neue Topologieoptimierungsverfahren im Bereich Computational Fluid Dynamics (CFD) bieten die Möglichkeit, solche Bauteile für den jeweiligen Anwendungsfall optimiert zu dimensionieren und somit zu einer Steigerung der Effizienz des Gesamtsystems beizutragen. Darüber hinaus kann die Topologieoptimierung schon in sehr frühen Phasen des Entwicklungsprozesses eingesetzt werden und somit helfen, die Anzahl an Entwicklungsstufen zu reduzieren.

### Grundlagen der Topologieoptimierung

Im Gegensatz zur parameterbasierten Optimierung, die ausgehend von einem ersten parametrisierten Geometrie-Modell durch Veränderung der Parameter „bessere“ oder „optimale“ Geometrie-Varianten finden soll, basiert die Topologieoptimierung auf einem deutlich freieren Ansatz.

Ausgangspunkt ist hier der für ein gesuchtes stromführendes Design maximal verfügbare und mit entsprechenden Randbedingungen versehene Bauraum. Die Optimierungsaufgabe besteht darin, diejenige Untermenge an Zellen innerhalb des (vernetzten) verfügbaren Bauraums zu finden, die eine im Hinblick auf das Optimierungsziel möglichst geeignete Kanalform ist. Der prinzipielle Lösungsraum hierbei ist durch die Variantenvielfalt außerordentlich groß. Das einfache Setup und der nur durch Randbedingungen und verfügbarem Bauraum beschränkte Lösungsraum sind zwei Vorzüge dieses Verfahrens.

Die beschriebene Optimierungsaufgabe kann mithilfe von auf Optimalitätskriterien basierten Verfahren gelöst werden. TOSCA-Fluid verwendet das Prinzip der „Rezirkulationsversandung“, das erstmalig von Moos/Klimezek/Rossmann [1] vorgestellt wurde.

Der Ansatz basiert auf Kenntnissen über die nachteiligen Effekte von Rückströmungen, Wirbeln und „Totwasser“-Regionen auf den Druckabfall und andere relevante Strömungsgrößen für geführte Strömungen. Rezirkulationsgebiete werden in einem iterativen Vorgang sukzessive auf Zellebene beseitigt. Dieser Vorgang wird als Sedimentation bezeichnet. Eine besonders attraktive Eigenschaft dieses Verfahren ist, dass nur ein einziger CFD-Solver-Lauf für die gesamte Topologieoptimierung benötigt wird.

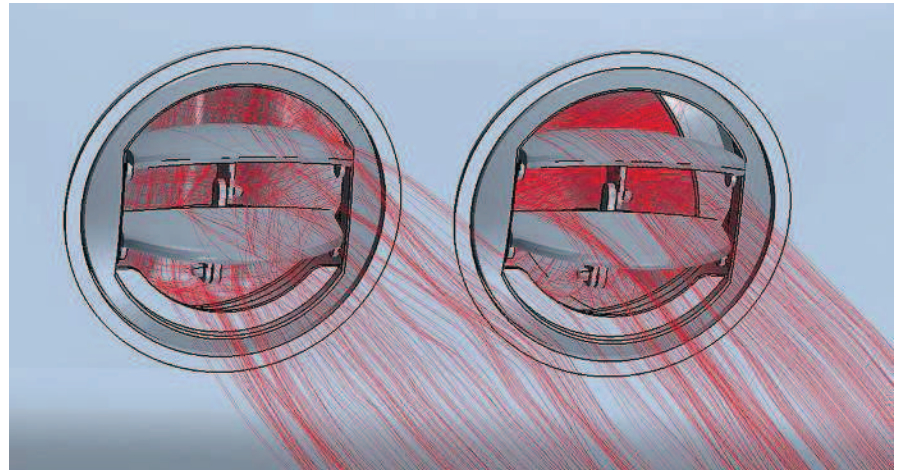


Abb. 3.5-1: Austrittsdüsen des Klimasystems eines Stadtbusses

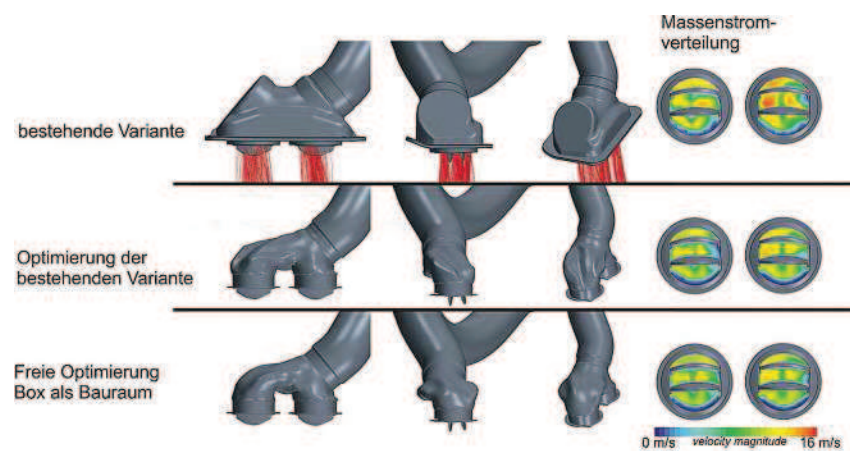


Abb. 3.5-2: Überblick Verteilerbox: Basis, Optimierung der bestehenden Variante, freie Optimierung mit Box als Bauraum, Geometrie links, Massenstromverteilung rechts

In einem vorbereitenden CFD-Lauf wird zunächst für jede Zelle eine anzustrebende Referenzstromrichtung ermittelt. Die globalen Referenzstromrichtungen können über repräsentative Pfadlinien, den sogenannten „Primary Particle Tracks“, visualisiert werden.

Danach erfolgt die eigentliche Optimierung direkt durch einen gekoppelten Lauf von TOSCA-Fluid und dem verwendeten CFD-Löser. Nach jeder Iteration der Strömungsgleichungen werden alle Zellen über einen Vergleich zwischen aktueller und zuvor berechneter Referenzstromrichtung überprüft, ob sie zu dem Strömungsgebiet gehören oder nicht. Zellen, die dem Optimierungskriterium nicht genügen, erhalten nach und nach einen höheren Sedimentationsgrad und werden nicht mehr durchströmt. Vom ursprünglichen maximal verfügbaren Bauraum verbleibt neben sedimentierten Bereichen ein unsedi-

mentiertes, optimal durchströmtes Design-Gebiet, das im Postprocessing noch extrahiert und geglättet werden muss.

### Anwendungsbeispiel Verteilerdüse

Die Topologieoptimierung soll auch konkrete Konstruktionsvorschläge für Problemstellungen aus der Praxis liefern. Die Verteilerdüse in Abbildung 3.5-1 aus dem Klimasystem eines Nutzfahrzeugs liefert einen Einblick in mögliche Anwendungen.

Um im Fahrerbereich ein angenehmes Klima zu schaffen, wird klimatisierte Luft über ein Rohrsystem zu Austrittsdüsen geleitet. Die Düsen können entsprechend den Vorgaben des Fahrers angepasst werden. Die Ziele im Entwicklungsprozess sind neben einem geringen Druckverlust, der den Gesamtwirkungsgrad des Systems beeinflusst, auch eine ausgeglichene Durchströmung beider Düsen. Nach Standard

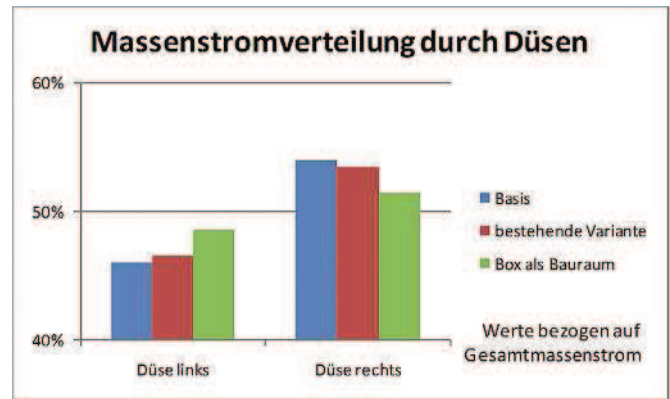
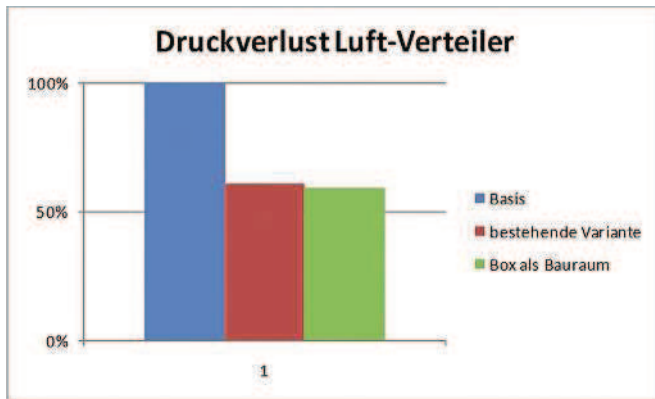


Abb. 3.5-3: Druckverluste und Massenstromverteilung durch Verteilerdüse

sind beide Düsen über eine Verteilerbox miteinander verbunden. In Abbildung 3.5-2 ist die geometrische Form als „bestehende Variante“ dargestellt.

Die Topologieoptimierung wird hier eingesetzt, um einen Konstruktionsvorschlag zu generieren, wie ein Bauteil unter strömungstechnischen Gesichtspunkten aussehen sollte. Dabei soll eine signifikante Reduktion des Druckverlusts erreicht werden. Weiterhin ist eine gleichmäßige Massenstromverteilung über die Düsenquerschnitte und die Düsen selbst gefordert.

Im ersten Optimierungsschritt wird die bestehende Konstruktion als Optimierungsbauraum definiert, das heißt, nur innerhalb der bestehenden Konstruktion können Änderungen durch den Optimierer vorgenommen werden. Somit kann der neue Konstruktionsvorschlag lediglich kleinere Abmessungen einnehmen. Dies führt zu geringeren Abmessungen. Allerdings ist das Optimierungspotenzial in der Regel eingeschränkt, da der zur Verfügung stehende Bauraum bereits eingeschränkt ist. Die Optimierungsergebnisse dieser Untersuchung sind in Abbildung 3.5-2 unter „Optimierung der bestehenden Variante“ dargestellt.

Bei der zweiten Optimierungsvariante wird als Bauraum eine ausreichend große Box definiert, um so die größtmögliche geometrische Freiheit zu gewährleisten. Die Lösungen dieser Variante zeigt Abbildung 3.5-2 unter „Freie Optimierung Box als Bauraum“.

Die in Abbildung 3.5-2 dargestellten

Geschwindigkeitsverteilungen zeigen, dass durch Einsatz der Topologieoptimierung eine homogenere Strömungsverteilung erreicht wird, obwohl dies nicht explizit als Optimierungsziel definiert wurde. Die Unterdrückung von Rückströmgebieten liefert somit auch eine bessere Gleichverteilung, wie in Abbildung 3.5-3 (rechts) zu erkennen ist.

Die Betrachtung der Druckverluste in Abbildung 3.5-3 (links) zeigt die Potenziale, die durch den Einsatz von Topologieoptimierung im Entwicklungsprozess erreicht werden können: Beim vorliegenden Beispiel kann allein durch Optimierung eines vorhandenen Modells eine Reduktion des Druckverlusts auf circa 61 Prozent des Ausgangswerts erreicht werden. Eine Optimierung mit einer Box als Bauraum liefert nochmals eine minimale Verbesserung auf etwa 59 Prozent.

#### Ausblick

Die Topologieoptimierung im Bereich von Strömungssimulationen birgt erhebliche Potenziale. Ergebnisse dieser Untersuchung zeigen, dass die Methode auch bei Anwendungsfällen in der Praxis bereits erfolgreich eingesetzt werden kann. Trotzdem können die Ergebnisse durch Weiterentwicklungen der Methode verbessert werden.

Deshalb haben die Hochschulen Offenburg und Karlsruhe sowie die Firmen FE-Design GmbH, Daimler AG und Visenso GmbH das Forschungsvorhaben EUdaF-Energieeffiziente Umströmung durch automatisierte Formoptimierung initiiert. Im Fokus steht hierbei die Optimierung von umströmten Körpern.

#### Referenzen

- [1] Moos Oliver, Klimetzek Franz R., Rossmann Rainer (Daimler AG): Bionic Optimization of Air-Guiding Systems, 2004
- [2] TOSCA Fluid Ver. 2.0 User Manual, FE-Design GmbH, 2009
- [3] Häussler Pascal, Sauter Jürgen, Schützle Thomas, Helfrich Tobias, Clausen Peter (FE-Design) Topologieoptimierung für geführte Strömungen. NAFEMS Wiesbaden: s.n., 2007
- [4] Nur einmal rechnen. FE-Design., s.l. : KEM, Februar 2009
- [5] Stephan Markus, Häußler Pascal, Schützle Thomas, Johannsen Daniel (FE-Design): An Efficient Approach for CFD Topology Optimization. NAFEMS Wiesbaden : s.n., 2008
- [6] Gottlieb Andreas, Strobel André, Stephan Markus: Simvec Anwendung der Topologieoptimierung für strömungsführende Bauteile im Fahrzeugentwicklungsprozess, 2010